

船用エンジンプラントHILシミュレータの二元燃料対応

飯塚 大貴 *

尾崎 一博 **

片岡 思温 **

梶谷 哲平 *

上田 貴哉 **

小池 涼太 **

Dual-Fuel Capability for Marine Engine Plant HIL Simulator

by Hiroki Iitsuka *

Kazuhiro Ozaki **

Shion Kataoka **

Teppei Kajitani *

Takaya Ueda **

Ryota Koike **

Key Words: Marine Engine, Hardware-in-the-Loop Simulation, Dual-Fuel Operation

要旨

本研究では、船用エンジンのリアルタイムシミュレータにおいて、二元燃料運転への対応を目的とした機能拡張を実施した。従来の重油運転機能に加え、天然ガスやメタノールを使用する二元燃料機能を新たに実装し、既存のシミュレータに統合した。本シミュレータは燃料切り替え時の過渡応答や負荷変動に対する挙動を忠実に再現することが可能であり、コントローラ実機とシミュレータを連携させるHIL（Hardware-in-the-Loop）シミュレーションとして活用することで、ECS（Engine Control System）の動作検証に有効な手段として機能することが期待される。今後は、さらなる新燃料への対応も視野に入れ、より高度なシミュレーション環境の構築に向けて開発を推進していく予定である。

*株式会社三井E&S 成長事業推進事業部 デジタル・ソリューション部 デジタル開発グループ

**株式会社三井E&S 船用推進システム事業部 エンジン設計部 基本設計グループ

©日本船舶海洋工学会

1. 緒 言

地球温暖化対策や環境保護意識の高まりを背景に、国際海運における排出ガス規制においても NOx・SOx に加え GHG (Greenhouse Gas: 温室効果ガス) を考慮するようになった。国際海事機関 (IMO) による海洋環境保護委員会 (MEPC) では、国際海運からの GHG 削減に対する中期対策の策定が進んでおり¹⁾、GHG 排出の少ない新燃料転換への動きはますます加速している。この動きに呼応するように、当社を含めた船用エンジンメーカー各社においても新燃料対応エンジンの開発が進展²⁾³⁾している。

また、近年は海事分野でもデジタル技術の導入が加速している。海上通信環境の整備も伴い、船舶及びその周辺環境のデジタル化が急速に進んでおり、国内外で MBD (Model-Based Development: モデルベース開発) やデジタルツイン技術の導入が注目されている⁴⁾⁵⁾。当社においてもデジタルツイン技術の活用に向けた取り組みを実施・継続しており、船用エンジンに対する HIL (Hardware-in-the-Loop) シミュレーション環境の構築とその実製造プロセスへの適用について報告した⁶⁾。本シミュレーションは、エンジンの動的挙動を再現するリアルタイムシミュレーション、およびシステムの制御装置である ECS (Engine Control System) との接続による制御検証が可能であり、ECS の検証体制を整えることで、エンジン試験の効率化および信頼性向上に貢献している。

本稿では、これまでに構築した船用エンジン HIL シミュレーションの技術を基盤とした、二元燃料機能実装の詳細について述べる。

2. HIL シミュレータ概要

2.1 HIL シミュレーションの概要

HIL シミュレーションの概要を Fig. 1 に示す。これは、モデルベース開発の V 字プロセスにおける装置動作検証手法の一つであり、実制御装置などの物理的ハードウェアをシミュレータ上に構築された仮想環境やシステムと統合し、ハードウェアの動作および性能をテスト・評価・検証するシミュレーション手法である。本開発の環境構築においては、MathWorks 社製シミュレーション・解析ソフトウェアの MATLAB/Simulink、および Simulink との互換性が高い Speedgoat 社製のシミュレーションハードウェアを使用した。

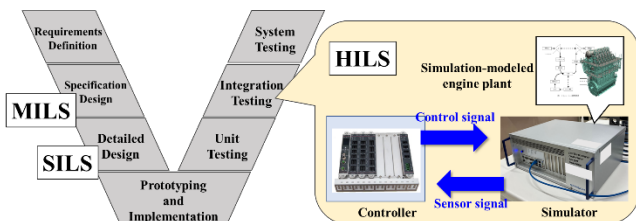


Fig. 1 Overview of marine engine HIL simulation.

2.2 HIL シミュレータの構成

HIL シミュレーション上で動作するシミュレータにおいて、「①計算精度」と「②リアルタイム性」の両立は不可欠である。本シミュレータにおいて、これらの要件は以下のように定義される。

- ① 通常運転時において、ECS が異常と誤認しない程度のエンジン挙動を再現可能であること。加えて、シミュレータ上で異常状態を意図的に再現した際には、物理法則に基づいた妥当な異常挙動が再現される必要がある。すなわち、数値的な厳密性よりも、システム全体としての因果関係や動的連携が保たれていることが重要であり、局所的な変化が全体挙動に影響を及ぼすようなモデル構造が求められる。
- ② ECS が要求する最小応答周期 (本 ECS では 0.1msec) 以内に、シミュレータが演算および信号応答を完了すること。対象 ECS はエンジンプラント全体の統合制御を担っており、個別機器単位ではなくシステム全体の状態に対して制御信号を出力する。そのため、シミュレータは演算処理および信号入出力処理をこの周期内に完了する必要がある。特に、300 チャネル以上に及ぶアナログ・デジタル信号の入出力制御が含まれるため、I/O 処理に起因するレイテンシは無視できず、リアルタイム性確保の上で重要な設計要素となる。

本 HIL シミュレータは、条件①および②の両立に加え、検証を行うエンジン構成が実務上多様であるため、迅速なセットアップが可能なハードウェア構成が求められる。以上の要件を踏まえ、Fig. 2 に示す構成を採用した。

本構成では、プラントモデルを関連性の高い機能単位に分割し、共有メモリを介して接続された複数の計算機による分散処理を行うことで、各計算機の負荷を軽減し、計算精度と処理速度の両立を図っている。物理モデルは、各計算機と LAN で接続されたシミュレータ操作用 PC を介して管理されており、モデルの迅速な切り替えや実行時のパラメータ変更が可能である。加えて、分散処理により各計算機の処理能力に余裕が生じたことで、将来的な機能追加に伴うモデル拡張や I/O チャネルの増加、モデル詳細化による精度向上にも柔軟に対応可能である。

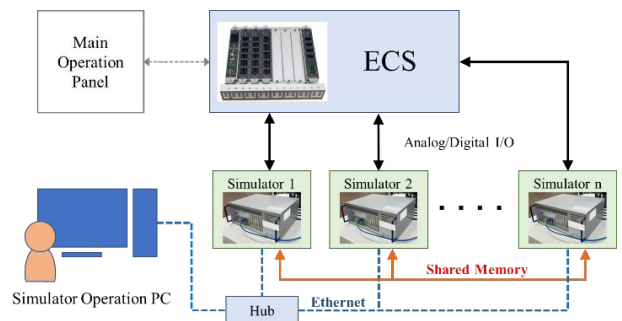


Fig. 2 Configuration of marine engine HIL simulator.

3. シミュレータへの二元燃料機能の実装

2.3 シミュレーションモデル

本シミュレーションに用いるハードウェアは、4台の計算機で分散処理を行う構成であるが、各モデル要素の配置は、①ECS との通信データ量とその処理負荷、②シミュレーション計算負荷、③計算機間共有メモリの転送負荷、の3要素のバランスを考慮して決定した。加えて、入出力信号の構成やシリンダ数増加時の計算負荷の均等化を考慮し、奇数番号シリンダと偶数番号シリンダの処理をそれぞれ別の計算機に割り当てた。

エンジンの構成要素をモデル化するにあたり、本開発では各構成を代表的な機器単位で分割し、ボリューム要素として定義した。各ボリューム要素は圧力、温度、質量流量などの物理量を保持し、要素間の相互作用は物質およびエネルギーの移動に関する抵抗要素を介して記述される。

また、本シミュレーションモデルでは、エンジン挙動の記述に際し、ホワイトボックス型の物理モデル（数式ベース）を優先的に採用した。これは、当社エンジンが受注生産であり個々の特性が異なるため、ブラックボックス型モデルの利点を活かすづらいこと、および、物理モデルパラメータの調整により、実機の詳細な運転データを用いずとも ECS の動作検証が可能であることに起因する。また、物理現象を運動方程式や状態方程式の形で記述することで、モデル調整時に操作するパラメータの物理的意味とシステムへの影響を明確に把握できるという利点がある。

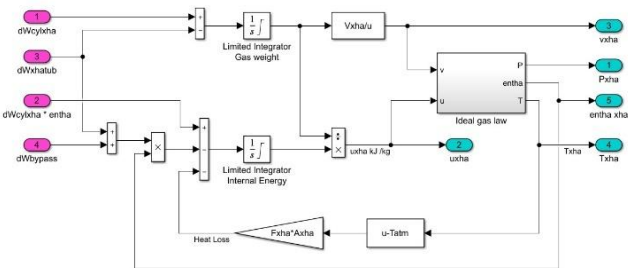


Fig. 3 Example of model implementation using Simulink.

数式モデルは、シミュレータ上で再現すべき現象を過不足なく表現できる範囲で簡略化した。例えば、Fig.3 のような排気レシーバにおける空気・ガスの挙動再現のモデルでは、質量および内部エネルギーの保存則に基づき、理想気体として取り扱うことで、温度や圧力を理想気体の状態方程式により導出した。このような比較的低压・高温環境下では簡潔な数式モデルによって ECS の検証に必要な動特性を十分に再現可能であるが、シリンダ内のように圧力変動が大きい箇所においては、必要に応じて詳細なモデルを適用した。これらのモデル構成および精度については既存研究⁷⁾にて妥当性が検証されており、本開発ではその成果を基盤としてシミュレータへの実装・機能拡張を実施した。

今回の開発では、二元燃料エンジン機能としてメタノール・天然ガス・プロパンの三種類をシミュレータに実装した。該当エンジンで追加される機器は、二元燃料供給装置・配管と二元燃料コントロールブロック・燃料噴射弁であり、Table 1 に示す通り、計算機 2, 3, および 4 に配置した。

Table 1 Model allocation and additional components (underlined).

Simulator		Deployed models
1	Ventilation / EGR / SCR	Turbo charger / Scavenging receiver / Inter cooler / Exhaust receiver / EGR / SCR
2	Kinematic / Hydraulic	Crank / Propeller (water brake) / Hydraulic system <u>+ Dual Fuel Supply System</u>
3	Cylinders (odd No.)	Fuel injection system / Exhaust valve / Cylinder combustion <u>+ Dual Fuel Block / Injection system</u>
4	Cylinders (even No.)	Same as above

3.1 二元燃料供給系の実装

二元燃料供給系の主要構成要素は、配管および ECS により動作が制御されるバルブである。これらの要素を流れる流体は、運転シーケンスごとに流体の種類および物性が変化するため、一意の物理式で表現することは難しい。ゆえに、文献⁸⁾に基づき、以下に示す式を用いることとした。

$$\dot{m} = K\rho A \sqrt{\frac{2(p_u - p_d)}{\rho}} \quad (1)$$

$$\dot{m}_{SC} = K\rho A \left(\frac{p_d}{p_u}\right)^{\frac{1}{\gamma}} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \frac{p_u}{\rho} \left\{1 - \left(\frac{p_d}{p_u}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right\}} \quad (2)$$

$$\dot{m}_{CR} = KA \sqrt{\gamma p_u \rho \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (3)$$

各バルブを通過する流体の質量流量 \dot{m} [kg/s] の算出において、液体のような非圧縮性流体についてはオリフィス上流圧力 p_u [Pa] と下流圧力 p_d [Pa] の差圧から流量を求める(1)の式を、圧縮性流体については(2)と(3)の式を用意し、状況に応じて使用する式を切り替える方法を採用した。ここで、 K は流量係数、 ρ [kg/m³] はオリフィス上流の流体密度、 A [m²] はオリフィス断面積、 γ は流体の比熱比であり、添え字の SC と CR はそれぞれ亜臨界流および臨界流での物性値であることを示す。

また、配管内圧力等の算出において、様々な物性が変化する状況では、理想気体の状態方程式を使用することはできない。そこで、物性データベースツールの REFPROP を活用し、各種配管を流れる流体の密度と圧力の関係（温度は 30°C を想定）をテーブル化し、密度から圧力を推定する方式を採用した。

3.2 二元燃料噴射・燃焼系の実装

二元燃料噴射系は、管およびオリフィスの集合体とみなすことができるため、3.1 節と同様の方法でモデル化を行った。燃焼系については、従来の重油炊きエンジンにおける計算方法を踏襲し、シリンダ内における物質収支とエネルギー収支、および燃料の燃焼速度を考慮したモデルを使用した。燃焼速度は酸素濃度と未燃燃料量により決定し、液体燃料の場合は気化速度を考慮した。

4. 二元燃料機能の検証

作成したモデルを HIL シミュレータに実装し、機能検証を実施した。

Fig. 4 は、燃料インデックスおよびエンジン負荷の時間変化について、本シミュレータによる結果とメタノール炊きエンジン実機の試運転データを比較したものである。比較する状態は、エンジン負荷 85%において重油運転から二元燃料運転（本ケースではメタノール）へ切り替える操作とした。Fig. 4(a)は重油燃料インデックス、Fig. 4(b)は二元燃料インデックスを示しており、両値は時間経過とともに入れ替わっている。一方、Fig. 4(c)はエンジン負荷の推移であるが、こちらは燃料切り替え中も一定に保たれている。シミュレータの結果も実機の挙動に近く、燃料切り替えの様子が再現できることが示された。

また、Fig. 5 はシミュレータ上で疑似的に不具合を発生させた際の挙動を示す一例である。不具合の状態として、メタノール運転中に燃料噴射弁アトマイザ開口面積を通常時の①95%、②80%、③50%、④20%の順で段階的に絞りを、アトマイザに詰まりが発生したケースを模擬している。①ではアトマイザの開口面積が絞られたことによる燃料供給不足を燃料インデックスの増加により補おうとしているが、インデックスリミットに当たっている状態である。その後は開口面積を絞るごとにエンジン負荷も段階的に低下し、④の段階でメタノール噴射が停止し重油運転に切り替わった。このように、二元燃料エンジンの異常に対し ECS がどのように制御動作を行うか、本シミュレータにより確認することができた。

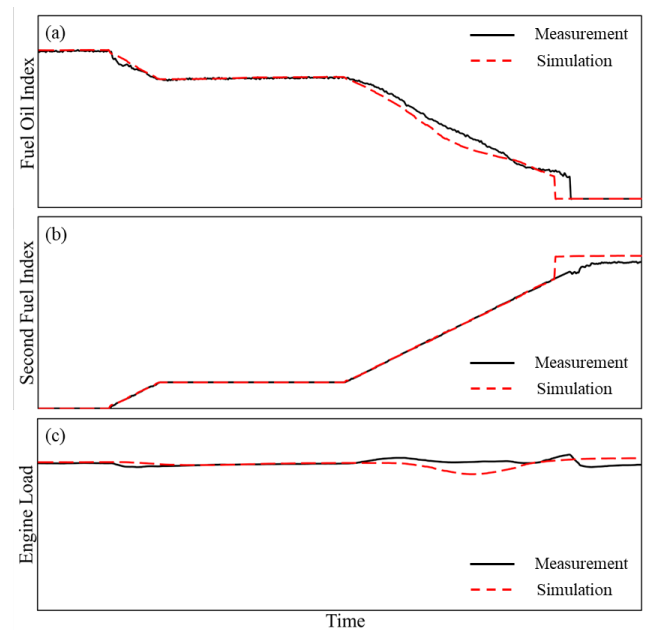


Fig. 4 Comparison of dynamic characteristics of a dual-fuel engine at 85% load: experimental measurements vs. simulation results.

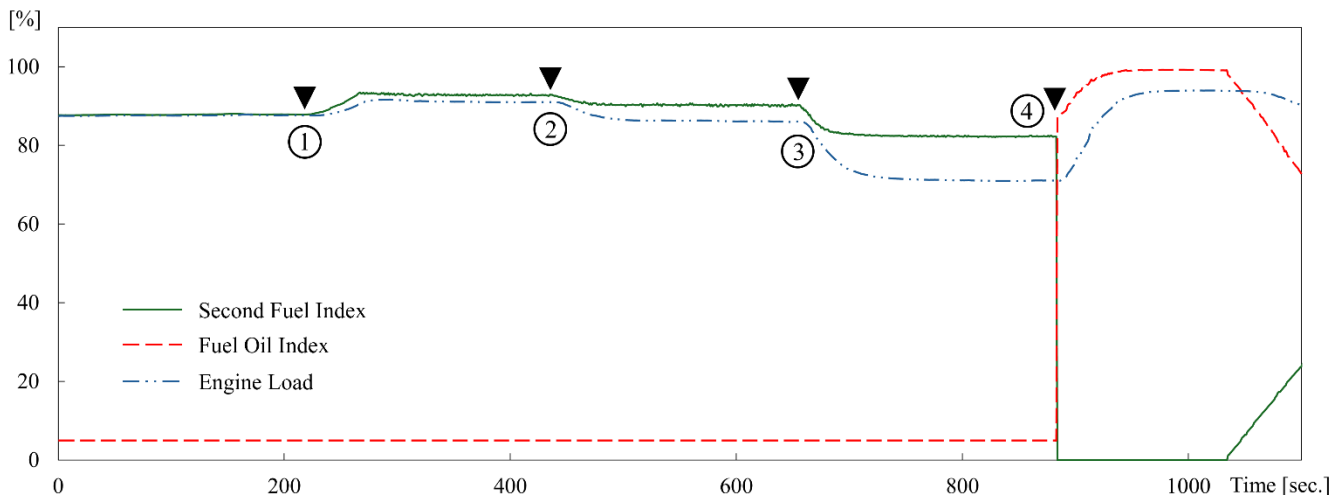


Fig. 5 Simulation-based reproduction of abnormal conditions in a dual-fuel engine at 85% load using the HIL simulator.

5. おわりに

本研究では、開発中の船用エンジン HIL シミュレータに二元燃料エンジン（メタノール・天然ガス・プロパン）機能を実装し、重油運転からの切り替え運転について、実機 ECS と連携したシミュレーションが可能であることを確認した。また、異常状態を模擬した場合においても、エンジンの物理的挙動を再現できることを確認した。これらの結果から、本シミュレータを用いることで、二元燃料対応船用エンジンに関する ECS の動作検証を有効に実施できることが示された。

現在、当社では世界初となるアンモニア焼き大型低速二元燃料エンジン及び燃料供給装置の商用機に関する試験運転を進めている⁹⁾。これに伴い、本シミュレータにおいても、アンモニア燃料への対応を視野に入れたモデル実装の準備を進めており、今後のエンジン試験の効率化および信頼性向上に貢献していく所存である。

参考文献

- 1) ClassNK : Introduction to the Deliberation Results of MEPC 83, https://www.classnk.or.jp/hp/pdf/tech_info/tech_img/T1354j.pdf, Accessed on 2025/8/28.
日本海事協会 : MEPC 83 の審議結果の紹介
- 2) Japan Engine Corporation : The first Japanese developed and manufactured commercial unit of a large, low-speed, two-stroke engine started co-firing operation with ammonia, a zero-emission fuel for next-generation ships, <https://www.j-eng.co.jp/en/news/20250421.html>, Accessed on 2025/9/3.
株式会社ジャパンエンジンコーポレーション : 純国産大型低速2ストロークエンジンの商用機として初めて、次世代船舶向けゼロエミッション燃料である アンモニアの混焼運転を開始しました (プレスリリース)
- 3) Hyundai Heavy Industries Co., Ltd. : HD Hyundai Heavy Industries Develops Eco-Friendly Ammonia Dual-fuel Engine, <https://www.hd.com/en/newsroom/media-hub/press/view?detailsKey=3292>, Accessed on 2025/9/4.
- 4) Murayama, H., Aoyama, K., Nakashima, T., and Ando, H., : Maritime Digital Engineering, Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers KANRIN, No. 106, pp.20-26, 2023 (in Japanese).
村山英晶, 青山和浩, 中島拓也, 安藤英幸 : 海事デジタルエンジニアリング, 日本船舶海洋工学会誌 KANRIN, 第106号, pp.20-26, 2023.
- 5) Madusanka, N.S., Fan, Y., Yang, S., and Xiang, X. : Digital Twin in the Maritime Domain: A Review and Emerging Trends, Journal of Marine Science and Engineering, vol.11(5), 2023.
- 6) Kajitani, T., Watanabe, Y., Iitsuka, H., and Ozaki, K., : Digital Twin and Model-Based Development for Marine Engines: Building and Utilizing HILS for Marine Engines at Mitsui E&S, Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers KANRIN, No. 112, pp.14-18, 2024 (in Japanese).
梶谷哲平, 渡邊由香, 飯塚大貴, 尾崎一博 : 船用エンジンデジタルツインとモデルベース開発 — 三井E&S における船用エンジンの HILS 構築と活用 —, 日本船舶海洋工学会誌 KANRIN, 第112号, pp.14-18, 2024.
- 7) Tsuji, Y., and Tanaka, I. : Simulation Technology for Large Marine Diesel Engine in Dynamic Response, MITSUI ZOSEN TECHNICAL REVIEW, No. 204, pp.13-18, 2011 (in Japanese).
辻康之, 田中一郎 : 船用低速ディーゼルエンジンのシミュレーション技術の開発, 三井造船技報, 第204号, pp.13-18, 2011.
- 8) Matsuo, K. : Compressible Fluid Dynamics: Theory and Analysis of Internal Flow, Rikogakusha Publishing Co., Ltd. 1994.
松尾一泰 : 圧縮性流体力学 — 内部流れの理論と解析 —, 理工学社, 1994.
- 9) MITSUI E&S Co., Ltd. : World's First Test Operation of Large-bore Low-Speed Ammonia dual fuel engine and Ammonia Fuel Supply System Commercial Unit Starts, https://www.mes.co.jp/news/2025/0212_01/, Accessed on 2025/9/2.
株式会社三井E&S : 世界初アンモニア焼き大型低速二元燃料エンジン及び燃料供給装置商用機の試験運転開始 (プレスリリース)